

Трещиностойкость сталей в микросекундном диапазоне нагружения

В. А. Маковой

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, Киев, Украина

Проанализированы результаты исследований динамической прочности и трещиностойкости. Предложены модель и критерий разрушения, которые носят пространственно-временной характер. Исследована пространственно-временная природа разрушения.

Ключевые слова: разрушение, трещиностойкость, прочность, задержка разрушения.

Эксперименты при ударно-волновом нагружении позволяют получить сведения о фундаментальных прочностных свойствах материалов в условиях, исключающих влияние поверхности на процессы деформирования и разрушения. Благодаря этому в твердых телах удается реализовать состояния, близкие к предельно возможной прочности. В результате исследования динамического разрушения твердых тел при ударно-волновом нагружении получены данные, противоречащие классическим моделям прочности и трещиностойкости. Природа зависимости трещиностойкости от скорости в настоящее время изучена недостаточно [1]. Дальнейшие исследования изменений прочности на микроуровне и механизмов пластического деформирования будут способствовать созданию новых высокопрочных материалов и совершенствованию технологии их обработки. Остается актуальным обнаружение физической природы задержки разрушения (инкубационного времени).

Откольная прочность поликристаллов при ударно-волновом нагружении является непостоянной и зависит от размера зерна [2]. Результаты измерений сопротивления откольному разрушению армко-железа в исходном состоянии (размер зерна примерно 28 мкм), после интенсивной пластической деформации (зерно измельчилось так, что его средний размер определить по металлографическим шлифам не удастся), а также крупных зерен (5–10 мм) – фактически монокристаллов, показывают, что сопротивление разрушению субмикроструктурного железа мало отличается от откольной прочности монокристаллов.

При разработке модели разрушения сталей при импульсном нагружении необходимо учитывать их механические свойства, микроструктурные особенности разрушения на разных структурных уровнях и временной фактор. При феноменологическом подходе описание прочностных свойств сводится к рассмотрению понятий о пределе прочности, предельном состоянии материала, трещиностойкости [3]. Пределу прочности и характеристике трещиностойкости придается смысл константы материала. В то же время существует кинетический подход к описанию развития разрушения материалов [4]. Важнейшей характеристикой кинетической теории прочности является время от момента приложения нагрузки до разрушения конструкции (долговечность) [4,

5], что позволяет объединить и проанализировать разрушение при разных скоростях приложения импульсной нагрузки.

При экспериментальных исследованиях трещиностойкости сталей установлено увеличение критического коэффициента интенсивности напряжений (КИН) с ростом скорости его изменения [1, 6]. Значения динамической трещиностойкости (критический КИН) увеличиваются многократно [6] по сравнению со статической как для сталей, так и для полимерных материалов. Если при статическом нагружении критическую величину КИН можно считать константой при выполнении условий линейной механики разрушения, то при динамическом экспериментально определенные критические значения трещиностойкости зависят от скорости нагружения, способа приложения нагрузки и не являются константами.

Базовой в решении данной проблемы стала концепция инкубационного времени [7, 8]. Было предложено отказаться от традиционного критерия и считать, что разрушение наступает при превышении текущим динамическим КИН статической трещиностойкости в течение некоторого минимального (инкубационного) времени, которое можно полагать константой материала. Однако сведений о достаточной проверке предложенной концепции нет.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы на основе полученных ранее экспериментальных данных о разрушении сталей различных классов при импульсном нагружении [1] исследовать пространственно-временную природу динамического разрушения.

Длительное время единственной возможностью экспериментального изучения процесса разрушения твердых тел в микросекундном диапазоне нагружения служило исследование разрушения отколом в плоских волнах нагрузки (рис. 1) [2, 9].

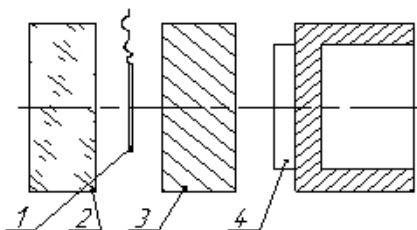


Рис. 1. Схема исследования разрушения отколом: 1 – датчик; 2 – накладка из ПММА; 3 – образец; 4 – пластина.

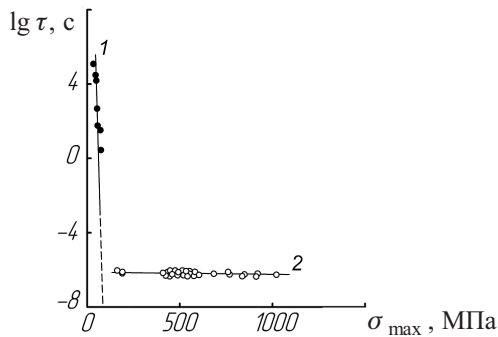
В полученных при нагружении плоскими ударными волнами зависимостях разрушающего напряжения от времени приложения нагрузки наблюдается излом кривой при переходе от квазистатического разрушения к откольному (рис. 2), что обусловлено возможным разрушением под действием напряжений, близких к теоретической прочности [9]. Согласно существующим временным схемам откола корреляция между откольной и квазистатической прочностью отсутствует. Для процесса разрушения, возникающего при взаимодействии встречных волн разряжения, характерны сверхмалые времена (≤ 1 мкс) и высокие разрушающие напряжения, которые во много раз превышают статический предел прочности (табл. 1). Анализ данных экспериментальных исследований стали [10, 11] (табл. 1) показывает тенденцию

увеличения разрушающего напряжения с повышением скорости нагружения и приближение его значения к теоретической прочности. Несмотря на это, можно установить, что откольное разрушение имеет особенности, аналогичные квазистатическому разрушению: начинается с появления зародышевых дефектов и заканчивается ростом микро- и макротрещин [9, 10].

Т а б л и ц а 1

Результаты исследований динамической прочности

Сталь	Статический предел прочности, МПа	Откольная прочность, МПа	Время повышения нагрузки до максимума, мкс	Литературный источник
Ст. 3	400	1600	2,18	[11]
	400	2700	0,66	
08кп	400	3810–4280	0,67	[10]
	400	4870–5480	0,34	
	400	5940	0,17	

Рис. 2. Зависимость статической (1) и динамической (2) прочности алюминия от времени τ .

На основании экспериментальных данных [9] установлено, что процесс откольного разрушения многоочаговый, в зоне растягивающих усилий происходит зарождение большого количества микротрещин, которые в дальнейшем сливаются в единую магистральную, разделяющую образец на две части. Однако при быстром росте растягивающих напряжений в волнах с напряжениями порядка 8000 МПа, как показывают результаты [11], откольные разрушения удовлетворительно описывает схема мгновенного откола. Эффект мгновенного откола наиболее ярко проявляется для пластичных металлов, так как предел прочности при растяжении значительно превышает предел текучести, в условиях одноосной деформации разрушение происходит при напряженном состоянии, близком к всестороннему растяжению. Подобное состояние реализуется также вблизи вершины растущей трещины отрыва. Поскольку скорости зарождения и роста несплошностей не могут быть сколь угодно большими, то чем выше скорость приложения нагрузки, тем большие значения растягивающих напряжений могут быть реализованы в материале. В свою очередь, чем больше величина перенапряжения в материале, тем более

мелкие и многочисленные центры разрушения активизируются и приводят к увеличению скорости процесса разрушения.

В настоящее время нет прямых методов, позволяющих измерять напряжения или деформации в области разрушения, и о процессе откольного разрушения судят по экспериментально фиксируемой скорости $W(t)$ свободной поверхности [2]. Для материалов имеет место значительный разброс вычисленных значений разрушающих откольных напряжений, которые изменяются в зависимости от условий эксперимента, толщины материала, скорости нагружающей пластины и толщины образца. Для улучшения сопоставимости результатов исследования проводят при фиксированной высокой скорости нагружения ($V \approx 1$ км/с) и изменяющейся толщине образца [12].

Разработка новой методики исследования разрушения отрывом при испытании кольцевых образцов при импульсном нагружении позволяет расширить представления о природе разрушения. Испытания проводили на пневмопороховом копре со скоростями ударника 140...600 м/с (рис. 3) при нагружении длинными импульсами большой интенсивности, когда время нарастания нагрузки в импульсе τ больше времени до наступления критического состояния t_c , $\tau \geq t_c$. Это обеспечивает нагружение с кинетической энергией, превышающей энергию, которая расходуется на разрушение образца, в десятки раз [1].

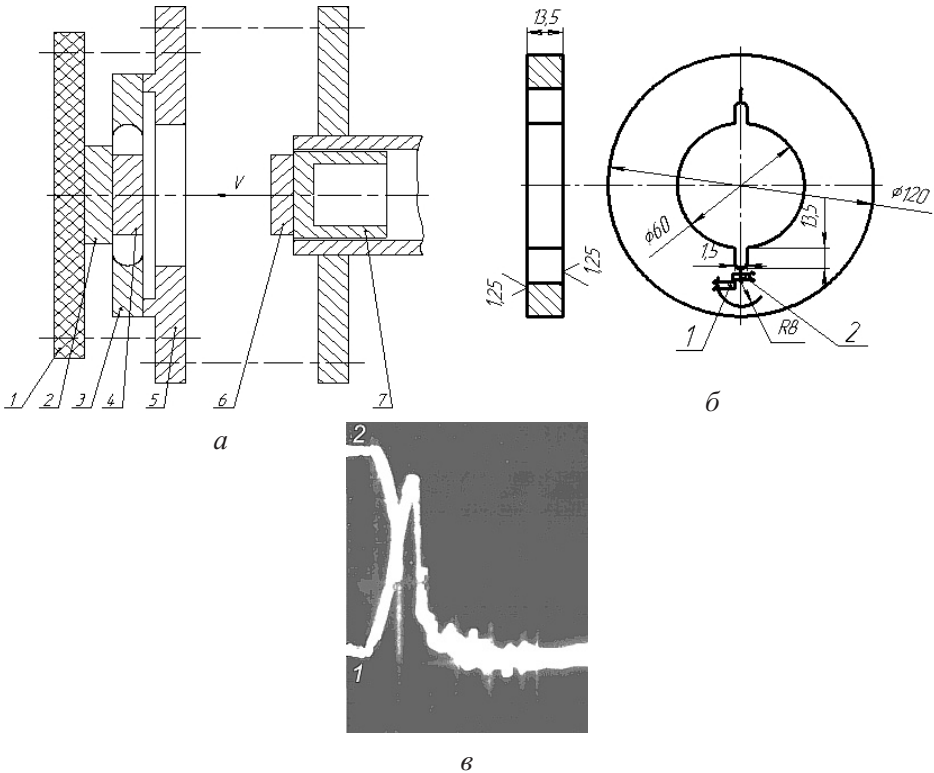


Рис. 3. Схема испытания кольцевых образцов – а, места наклейки на них датчиков – б и типовые осциллограммы сигналов от датчиков упругой деформации (1) и (2) – в.

Образец 3 крепился перед дульным срезом ствола копра на фланце 5 с помощью деревянной пластины 1 и нагружался внутренним импульсным

давлением, возникающим при сжатии алюминиевого диска 4 между стальным ударником 6, который закреплен на стакане 7 и разгоняется в стволе, и неподвижным диском 2 (рис. 3,а).

В качестве характеристики разрушения принята трещиностойкость (критический коэффициент интенсивности напряжений в устье трещины в момент ее страгивания K_{1d}). В экспериментальных исследованиях использовали образцы с предварительно наведенными усталостными трещинами (рис. 3,б). При этом измеряли упругую деформацию непосредственно вблизи вершины трещины. Перед динамическими испытаниями проводили предварительную статическую тарировку образцов [6]. Страгивание трещины фиксировали датчиком разрыва.

По результатам исследований динамической трещиностойкости (рис. 4) построена зависимость времени до момента страгивания трещины (долговечности) от трещиностойкости K_{1d} (рис. 5).

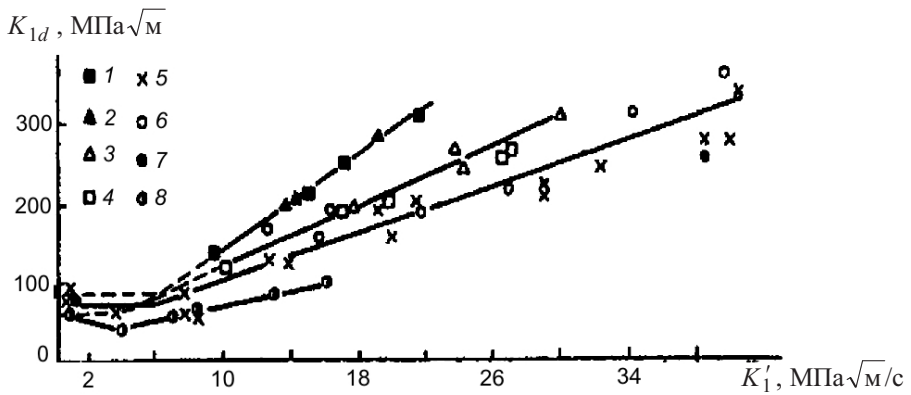


Рис. 4. Зависимость динамической трещиностойкости сталей от скорости изменения КИН: 1 – сталь Ст. 3, $T = 293$ К, толщина образца $B = 15$ мм; 2 – сталь Ст. 3, $T = 293$ К, $B = 20$ мм; 3 – сталь Ст. 3, $T = 213$ К, $B = 15$ мм; 4 – сталь Ст. 3, $T = 153$ К, $B = 15$ мм; 5 – сталь 40X, $T = 293$ К, $B = 12,5$ мм (46...50 HRC); 6 – сталь 40X, $T = 293$ К, $B = 25,4$ мм (46...50 HRC); 7 – сталь 40X, $T = 293$ К; 8 – сталь X2NiCoMo.

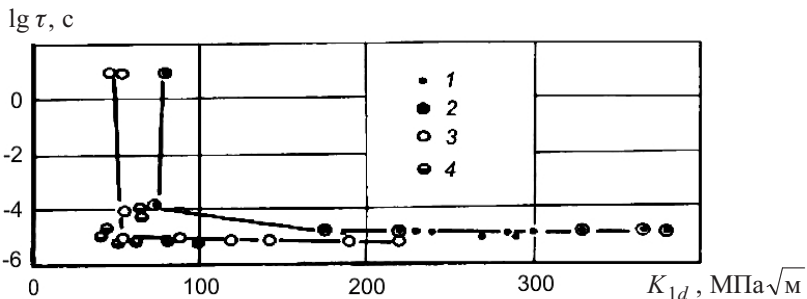


Рис. 5. Зависимость динамической трещиностойкости сталей от времени: 1 – 40X (46...50 HRC); 2 – Ст. 3, $T = 293$ К; 3 – Ст. 3, $T = 150$ К; 4 – X2NiCoMo.

Характер изменения этой зависимости аналогичен таковому зависимости долговечности от напряжений, вызывающих откольное разрушение. В микросекундном диапазоне нагружения долговечность слабо зависит от уровня трещиностойкости. Следует отметить, что поведение материала с трещиной и

сплошного материала характеризуется долговечностью с ветвями для высоких и низких скоростей нагружения. Размер переходного участка меньше для материалов с меньшей неоднородностью строения и дефектностью структуры.

При импульсном нагружении существует так называемый критерий минимального времени [8]. Временная задержка момента начала разрушения определяется скоростью распространения волны напряжений и запаздыванием текучести. Запаздывание текучести объясняется в основном с позиций теории дислокаций [13].

Предполагается, что вокруг дислокаций образуется атмосфера (облако) из атомов, которая тесно с ними связана, возможность вырваться из атмосферы определяется приложенной нагрузкой и температурой. Время задержки уменьшается с увеличением напряжения и температуры. Когда дислокация доходит до границы зерна, чтобы ее пройти, ей необходима значительно большая сила, чем освободиться. Тот момент, когда скопившиеся дислокации проходят границу, считается началом пластического течения. В работе [14] подтверждается эффект отсутствия пластического течения при малой длительности внешней нагрузки, несмотря на то что при более длительной нагрузке с таким же уровнем образец пластически деформируется. Это объясняется тем, что за время действия импульса не успевают возникнуть флуктуации напряжений, которые необходимы для движения дислокаций. При длительности импульса внешнего нагружения $\tau \sim 50$ мкс вероятность того, что флуктуации напряжения не вызовут движение дислокаций составляет 0,9, при $\tau \sim 5$ мкс – 0,99. Компенсировать данный эффект, т.е. вызвать пластическую деформацию при коротком импульсе, можно повышением напряжения в импульсе. Этот результат можно интерпретировать как увеличение предела текучести при уменьшении длительности ударного нагружения.

При проведении экспериментов на разрушение кольцевых образцов с двумя трещинами использовали схему испытаний, представленную на рис. 3 [1, 15]. Исследовали влияние скорости нагружения и низкой температуры на динамическую долговечность с определением времени до наступления критического состояния t_c и инкубационного времени t_1 (задержка разрушения). Время до страгивания трещины оценивали по данным регистрации сигналов от тензорезисторов, наклеенных перед трещиной (рис. 3), с помощью измерительного комплекса, в состав которого входят электронные осциллографы. Результаты испытаний показывают, что для разных сталей существует характерное инкубационное время, которое определяется по формуле

$$t_1 = \frac{K_{1d} - K_{1c}}{K'_1}, \quad (1)$$

где K_{1c} – трещиностойкость для условий плоской деформации при статическом нагружении; K'_1 – скорость изменения КИН.

Подтверждается гипотеза Кальтхоффа [8], согласно которой вершина трещины при импульсном нагружении должна испытывать действие сверхкритического КИН, который значительно больше статического ($K_{1d} > K_{1c}$), начиная с определенного минимального времени до начала быстрого распространения трещины (рис. 6). Не установлено, что страгивание трещины

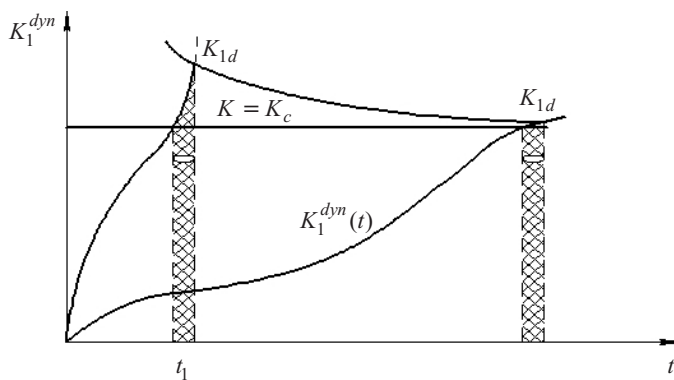
происходит на ниспадающей ветви КИН, т.е. при его снижении по достижении максимума, как приведено в работах [16, 17].

В табл. 2 представлены результаты испытаний разных сталей с измерением времени от начала нагружения до страгивания трещины и инкубационного времени, определенного по формуле (1), с учетом влияния скорости изменения КИН и температуры испытаний. Результаты исследований позволили создать специальные низкоуглеродистые стали, прочность и трещиностойкость которых в 2-3 раза выше таковых известных низкоуглеродистых сталей.

Т а б л и ц а 2

Результаты исследований трещиностойкости и времени до разрушения сталей

Сталь	КИН, МПа $\sqrt{м}$	$K_I' \cdot 10^{-7}$, МПа $\sqrt{м/с}$	T , К	t_c , мкс	t_1 , мкс	Литературный источник
40X	117...141	1,2...2,0	293	8,83	5,34	[15]
	193...219	2,1...3,0	293	8,40	6,40	[15]
Ст. 3	336...380	2,3...2,8	293	14,30	11,40	[15]
	240...300	1,6...2,2	153	9,60	5,20	[15]
X2NiCoMo	93...97	1,4	293	6,80	2,60	[8]

Рис. 6. Влияние инкубационного времени на динамическую трещиностойкость K_I^{dyn} [8].

Как показывают данные испытаний, большому инкубационному времени отвечают большие значения трещиностойкости. Инкубационное время увеличивается с ростом скорости нагружения и уменьшается при отрицательной температуре, зависит от материала и его состояния. Время до страгивания трещины, начиная с некоторого уровня, малочувствительно к скорости нагружения, однако с понижением температуры до 153 К оно уменьшается.

При предпринятых попытках определить время задержки разрушения расчетным путем возникли определенные трудности. В работах [16–18] предлагаются формально-механический подход, основанный на введении некоторой элементарной пространственно-временной ячейки разрушения, которая включает структурный размер d и структурное время τ передачи взаимодействия между соседними элементами структуры, а также структурно-временной критерий

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \frac{1}{d} \int_0^d \sigma(r, \theta, t') dr dt \leq \sigma_c, \quad (2)$$

где d – структурный размер для условий плоской деформации, $d = 2K_{1c}^2 / (\pi\sigma_c^2)$; σ_c – статическая прочность материала; τ – структурное время до разрушения, определяемое свойствами каждого материала, $\tau = d/C$; $\sigma(r, \theta, t')$ – максимальные растягивающие напряжения у вершины трещины ($r = 0$); C – максимальная скорость волны.

В данном случае рассматривается полубесконечная трещина в неограниченной упругой плоскости, к берегам которой прикладывается короткий импульс ($\tau < t_c$) – равномерно распределенная нагрузка прямоугольного профиля. Результаты расчетов структурного времени по формуле $\tau = d/C$ для сталей [19] показывают, что оно на порядок ниже, определенного экспериментально. Примененный в работах [16–18] подход, по мнению авторов, можно рассматривать как формально-механический способ определения критических параметров (структурного линейного размера и структурного времени до разрушения), основанный на временном критерии [20], согласно которому разрушение происходит, если силовой импульс, действующий в течение времени t' , достигает критического значения $J(t') \leq J_c$. Этот критерий, используемый для анализа разрушения, вызываемого короткими импульсами нагрузки ($\tau < t_c$), позволяет обосновать многие важные характеристики разрушения, в частности увеличение прочности материалов с ростом скорости нагружения. Однако результаты экспериментов и фрактографического анализа показывают значительное влияние структуры стали на этот процесс [2]. Учет структурных особенностей разрушения позволяет получить новую информацию о временной зависимости прочности материала, объяснение и теоретическое описание которой является актуальной задачей. Вместе с тем сложные физические теории разрушения, учитывающие структурные решения, не всегда эффективны при решении практических задач. Поэтому целесообразна разработка более простых методов, которые учитывают основные особенности динамического разрушения.

Ранее [16] были предложены модель и пространственно-временной критерий разрушения при импульсном нагружении длинными импульсами нагрузки ($\tau \geq t_c$), который базируется на упруговязкопластической модели деформирования материала в вершине трещины [21]. Критерий учитывает изменения физико-механических свойств материала и требует одновременного выполнения двух критериев: энергетического

$$\frac{dW}{dt} \leq \frac{d(F - U)}{dt}, \quad (3)$$

где dW/dt – энергия, необходимая для продвижения трещины на единицу длины; F – работа, совершаемая внешней силой; U – упругая энергия, содержащаяся в образце, и деформационного

$$\varepsilon(\rho_c) = \varepsilon_c; \quad (4)$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{\rho_c} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{r_{II}} \int_{t_0}^{t_c} r(\theta, t) \sigma_1(r, t, \theta) \varepsilon(r, t, \theta) d\theta dr dt, \quad (5)$$

где r, θ – полярные координаты; $r(\theta, t)$ – текущий радиус пластической зоны; t_0 – момент начала пластического течения; t_c – момент наступления критического состояния; $\varepsilon'(r, t, \theta)$ – скорость пластического течения материала; $\sigma_1(r, t, \theta)$ – главное напряжение, которое действует в локальной области вершины трещины; ρ_c – величина продвижения трещины, соответствующая размеру структурного параметра (размерам фасеток скола или межзеренного разрушения).

Согласно упруговязкопластической модели деформирования материала скорость течения может быть записана в виде

$$\varepsilon'(r, t, \theta) = \frac{\sigma_1(r, t, \theta) - \sigma_1^T}{k\mu_\tau}, \quad (6)$$

где μ_τ – коэффициент вязкости материала; k – коэффициент, учитывающий напряженное состояние.

Пластическое течение материала в любой точке неупругой области вблизи вершины трещины наступает по достижении главным напряжением (при $\theta = 0$ нормальным к плоскости трещины) величины σ_1^T , определяемой из выражения

$$\sigma_1^T = \frac{\sigma_T^d(1 + \sin \theta/2)}{\sqrt{(1 - 2\nu)^2 + 3 \sin^2 \theta/2}}, \quad (7)$$

где σ_T^d – динамический предел текучести, определяемый экспериментально; ν – коэффициент Пуассона.

Распределение напряжений в неупругой области после начала течения зависит от скорости роста КИН и в любой момент времени определяется следующим образом:

$$\sigma_1(r, t, \theta) = \left[\frac{K'_1}{\sqrt{2\pi r}} t_0 + \frac{K'_1}{\sqrt{2\pi r}} (t - t_0) \right] (\cos \theta/2 + \cos \theta/2 \sin \theta/2). \quad (8)$$

Радиус пластической зоны r_{II} зависит от скорости нагружения и времени и определяет ее размеры. Его можно найти при условии, что на границе $r(\theta, t) = r_{II}$ пластическая деформация $\varepsilon_{II} = 0$:

$$r_{II} = \frac{(K'_1)^2}{4\pi(\sigma_T^d)^2} t^2 [3/2 \sin^2 \theta + (1 - 2\nu)^2 (1 + \cos \theta)]. \quad (9)$$

Согласно формуле (8) радиус увеличивается во времени до момента страгивания трещины. Разрушение контролируется одновременно с помощью

двух критериев: энергии, которая подводится упругой волной в вершину трещины, и деформацией у вершины трещины на расстоянии ρ_c , которая достигает критического значения. При этом под действием концентрации напряжений происходит изменение физико-механических свойств материала у вершины трещины.

При сверхвысоких скоростях деформации в вершине трещины возможно достижение теоретической прочности. Возникает ее развитие без пластической деформации с началом разрушения при действии напряжений, близких к теоретической прочности.

Выводы

1. Впервые экспериментально исследованы временная задержка (инкубационное время) и время до страгивания трещины t_c (динамическая долговечность) при нагружении длинными импульсами ($\tau \geq t_c$). Установлено, что время до страгивания трещины t_c мало зависит от скорости импульсного нагружения и изменяется в зависимости от материала, структуры и температуры испытаний, инкубационное время с ростом скорости увеличивается.

2. Анализ экспериментальных и расчетных значений инкубационного времени показывает, что расчетные значения для сталей на порядок ниже экспериментальных, полученных при нагружении длинными импульсами. Более точно определяется инкубационное время при использовании упруго-вязкопластической модели деформирования материала в вершине трещины.

3. Природа разрушения в плоских волнах нагружения (откол) и разрушения отрывом при распространении одиночной трещины подобна и сопровождается слабой зависимостью долговечности от роста откольной прочности и трещиностойкости.

Резюме

Проаналізовано результати досліджень динамічної міцності і тріщиностійкості. Запропоновано модель і критерій руйнування, які носять просторово-часовий характер. Досліджено просторово-часову природу руйнування.

1. Степанов Г. В., Маковей В. А. Динамическая трещиностойкость конструкционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1993. – 143 с.
2. Каннель Г. И., Разоренов С. В., Фортон В. Е. Субмикросекундная прочность материалов // Механика твердого тела. – 2005. – № 4. – С. 86 – 113.
3. Нотт Дж. Ф. Основы механики разрушения. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
4. Журков С. Н., Петров В. А. О физических основах температурно-временной зависимости прочности твердых тел // Докл. АН СССР. – 1978. – 239, № 6. – С. 1316 – 1319.
5. Инденбом В. Л., Орлов А. Н. Долговечность материала под нагрузкой и накопление повреждений // Физика металлов и металловедение. – 1977. – 43, № 3. – С. 469 – 492.

6. Степанов Г. В., Маковой В. А. Влияние скорости нагружения на трещиностойкость закаленной стали // Пробл. прочности. – 1984. – № 6. – С. 31 – 35.
7. Kalthoff J. F. and Shockey D. A. Instability of cracks under impulse loads // J. Appl. Phys. – 1977. – **48**, No. 3. – P. 986 – 993.
8. Kalthoff J. F. Fracture behavior under high rates of loading // Eng. Fract. Mech. – 1986. – **23**, No. 1. – P. 289 – 298.
9. Златин Н. А., Мочалов С. М., Пугачев Г. С., Брагов А. М. Временные закономерности процесса разрушения металлов при интенсивных нагрузках // Физика твердого тела. – 1974. – **16**, № 6. – С. 1752 – 1755.
10. Тарасов Б. А. Сопротивление разрушению пластин при ударном нагружении // Пробл. прочности. – 1974. – № 3. – С. 121 – 122.
11. Ахмадеев Н. Х., Нигматулин Р. И. Моделирование откольного разрушения при ударном деформировании. Анализ схемы мгновенного откола // Прикл. механика и теорет. физика. – 1981. – № 3. – С. 120 – 128.
12. Дремин А. Н., Молодец А. М. Кинетические характеристики откольного разрушения // Там же. – 1980. – № 6. – С. 85 – 95.
13. Суворова Ю. В. Запаздывание текучести в сталях // Там же. – 1968. – № 3. – С. 55 – 62.
14. Морозов Н. Ф., Шихобалов Л. С. О влиянии длительности ударного нагружения на предел текучести // Докл. РАН. – 2008. – **422**, № 4. – С. 479 – 483.
15. Маковой В. О. Природа руйнування сталей при імпульсному навантаженні // Наук. вісті НТУУ “КПІ”. – 2009. – № 4. – С. 85 – 92.
16. Морозов Н. Ф., Петров Ю. В. Динамическая вязкость разрушения в задачах инициирования роста трещин // Механика твердого тела. – 1990. – № 6. – С. 108 – 111.
17. Морозов Н. Ф., Петров Ю. В. О концепции структурного времени в теории динамического разрушения хрупких материалов // Докл. РАН. – 1992. – **324**, № 5. – С. 964 – 967.
18. Петров Ю. В. О квантовой природе динамического разрушения хрупких сред // Докл. АН СССР. – 1991. – **321**, № 1. – С. 66 – 68.
19. Смирнов В. И. О пороговых силовых импульсах при откольном разрушении материалов // Прикл. механика и теорет. физика. – 2006. – **47**, № 5. – С. 97 – 106.
20. Никифоровский В. С., Шемякин Е. И. Динамическое разрушение твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1979. – 271 с.
21. Маковой В. А. Особенности разрушения сталей при импульсном нагружении // Пробл. прочности. – 1990. – № 5. – С. 66 – 70.

Поступила 14. 10. 2010